

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

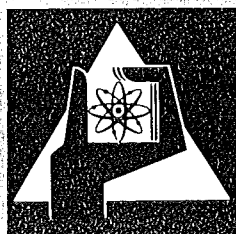
Mai 1974

KFK 1958

Institut für Experimentelle Kernphysik

**Wärmeübergang zu flüssigem Helium in vertikalen Kühlkanälen
bei konstantem und pulsartigem Wärmestrom**

C. Schmidt, P. Turowski



**GESELLSCHAFT
FÜR
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M.B.H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 1958

Institut für Experimentelle Kernphysik

Wärmeübergang zu flüssigem Helium in vertikalen
Kühlkanälen bei konstantem und pulsförmigem Wärmestrom

C. Schmidt und P. Turowski

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

Zusammenfassung

Wärmeübergangscharakteristiken zu Helium werden in vertikalen, 10 cm langen Kühlkanälen verschiedenen Querschnitts und mit unterschiedlichen Oberflächen aufgenommen. Der maximale Wärmestrom bei Bläschenverdampfung ist oberflächenunabhängig. Vor Einsetzen von Bläschenverdampfung wurden teilweise überraschend große Temperaturüberhöhungen festgestellt. Bei rauhen Oberflächen treten zusätzlich ausgeprägte Hysteresiserscheinungen auf. Untersuchungen des Temperaturverhaltens beim Einschalten einer konstanten Heizleistung und Experimente mit pulsförmiger Wärmelast zeigten, daß sich Filmverdampfung erst nach kurzer Verzögerung einstellt. Daher können im Pulsbetrieb größere maximale Heizleistungen als im stationären Betrieb abgeführt werden.

Abstract

Heat transfer to liquid helium in vertical cooling channels with constant and pulsed heat flow.

Data of heat transfer into liquid helium were measured in vertical cooling channels of 10 cm length with various cross sections and surfaces. The maximum heat flux for nucleate boiling is independent of surface treatment. Surprisingly large peaks in temperature rise were found before nucleate boiling sets in. Distinct hysteresis effects appeared in connection with rough surfaces. Studies of the temperature behaviour involving the switching-on of a constant heating power and experiments with pulsed thermal loads showed that film boiling does not start until after some short delay. Therefore, larger maximum heating powers may be tolerated in pulsed operation.

1. Einleitung

Zur Kühlung von Supraleitungsmagneten mit flüssigem Helium benötigt man Daten des Wärmeübergangs zur Kühlflüssigkeit. In einem Magneten erfolgt die Kühlung i. a. nicht oder nur zu einem Teil an freien Oberflächen, sondern in Kühlkanälen, durch die die Kühlflüssigkeit frei zirkulieren kann (free convection), Zwangsumlaufkühlung (forced convection) ist bisher noch wenig gebräuchlich.

In dieser Arbeit werden Experimente an einem vertikalen Kühlkanal von 10 cm Länge bei konstanter und pulsformiger Wärmelast beschrieben, sie dienen dem Studium der Wärmeabfuhr in gepulsten Aluminium-Kryomagneten und Supraleitungsmagneten.

Untersucht wurde das Temperaturverhalten der Kanalwände in Abhängigkeit vom Wärmestrom, der Einfluß des Kanalquerschnitts und der Oberflächenbeschaffenheit.

2. Experimenteller Aufbau und Meßmethode

Abb. 1 zeigt den Aufbau des Kühlkanals: Auf Scheiben aus glasfaserverstärktem Epoxydharz (100 x 40 x 5 mm) wurden 0,05 mm starke, 20 mm breite V2A-Stahlstreifen aufgeklebt, die die direkt geheizten Kühlkanalwände darstellen, und oben und unten mit Stromanschlüssen versehen. Mit auswechselbaren Abstandsstücken ließ sich die Kanaldicke einstellen. Unter die Stahlstreifen wurden an drei Stellen Kohlewiderstände (CR 1, .., CR 3) in den Epoxydharzträger so eingeklebt, daß sie guten thermischen Kontakt mit dem Metall hatten. Der Abstand des oberen und unteren Kohlewiderstandes von den Kanalenden betrug etwa 5 mm. Der Kühlkanal wurde vertikal in einem 10 ltr. He-Kryostaten eingebaut, alle Messungen erfolgten bei einer Badtemperatur von 4.2 K.

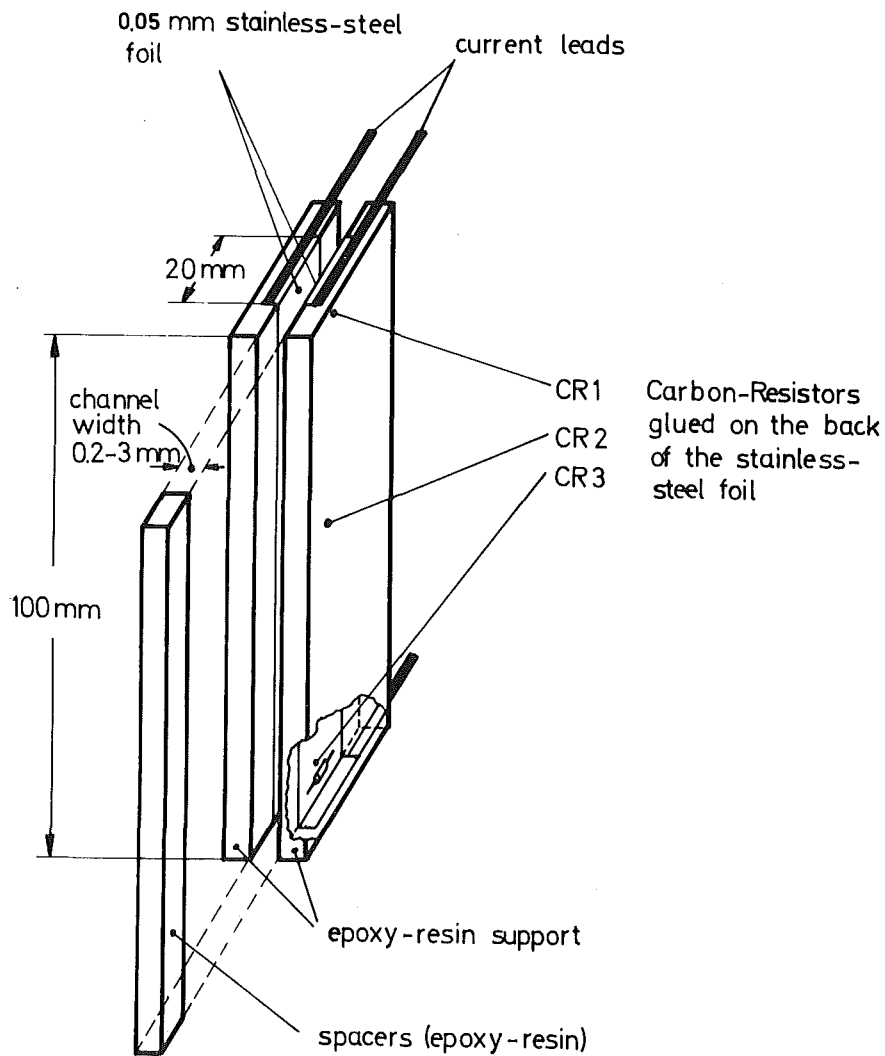


Abb. 1 Der Kühlkanal

Die Temperaturmessung der Kanalwand erfolgte mit Hilfe der Kohlewiderstände CR 1 . . . CR 3 (Allen-Breadly, 100 Ω , 0.1 W). Ein vierter Widerstand im Heliumbad diente als Vergleichswiderstand bei der Siedetemperatur des flüssigen Heliums. Die Kohlewiderstände wurden im Temperaturbereich zwischen 4 und 4.7 K gegen den Heliumdampfdruck geeicht. Jeweils einer der Widerstände CR 1 . . . 3 wurde zusammen mit dem Widerstand im Helium in eine Widerstandsbrücke geschaltet, und das an der Brücke auftretende, der Temperaturdifferenz zwischen Kanalwand und Helium entsprechende Signal wurde über einen Verstärker auf den x-Kanal

eines x-y-Schreibers gegeben, an dessen y-Kanal die über die Heizbleche des Kühlkanals abfallende Spannung lag.

Für eine vollständige Messung eines Kanals wurden nacheinander alle drei Kohlewiderstände in die Brücke geschaltet und durch Hoch- und Runterfahren des Stroms eine Heizleistung-Temperaturcharakteristik auf dem x-y-Schreiber aufgenommen. Die Heizleistung wurde dabei so langsam verändert, daß dynamische Effekte keine Rolle spielten (mit Ausnahme der Temperaturüberhöhung bei niedrigen Heizleistungen, wir kommen darauf noch zurück). Jede Messung wurde 1 - 2 mal wiederholt, um festzustellen, inwieweit die Ergebnisse reproduzierbar sind.

Der Wärmeabstrom durch den Epoxydharzträger sollte nach Abschätzungen weniger als 1 % der gesamten Heizleistung betragen. Für den Absolutwert der Temperaturdifferenz zwischen Kühlkanalwand und Heliumbad ist infolge schwer überschaubarer Einflüsse wie thermische Ankopplung der Widerstände, Wärmeleitung durch elektrische Zuleitungen und Eigenerwärmung ein relativ hoher Fehler zwischen 15 % bei geringen Heizleistungen und 30 % bei hohen Heizleistungen anzusetzen. Zudem ist zu beachten, daß die Temperatur an der dem Helium abgewandten Seite des Bleches gemessen wurde, in allen angegebenen Temperaturdifferenzen ist also der Temperaturabfall über die Stärke des Bleches enthalten. Diese Temperaturdifferenz zwischen Vorder- und Rückseite des Bleches ist proportional zur Heizleistung (bei konstanter Wärmeleitfähigkeit des Bleches) und sollte etwa 1 mK pro mW/cm^2 Heizleistung betragen.

3. Ergebnisse

3.1 Stationäre Heizung der Kühlkanäle

Abb. 2 zeigt ein Wärmeübergangsdiagramm für Helium, aufgenommen an einem 10 cm Kanal mit sandgestrahlter Oberfläche, Kanalquerschnitt $20 \times 3 \text{ mm}^2$, Meßposition CR 1. Beim Wärmeübergang von

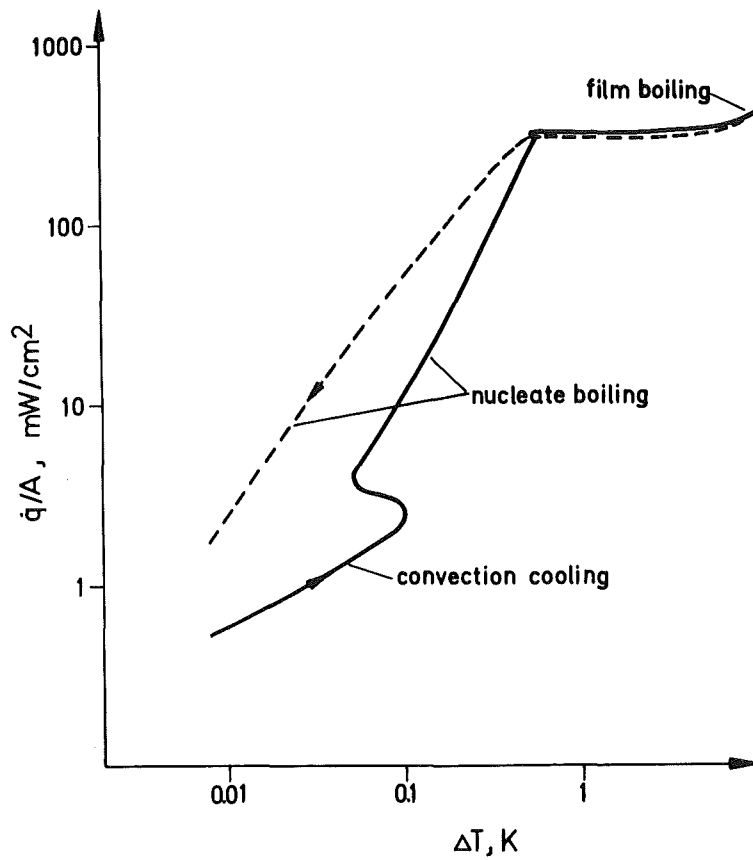


Abb. 2 Typisches Wärmeübergangsdiagramm für Helium, Kanallänge 10 cm, Kanalquerschnitt $20 \times 3 \text{ mm}^2$, sandgestrahlte Oberfläche, Meßposition CR1 (oben)

einer beheizten Oberfläche zur Flüssigkeit lassen sich drei Bereiche unterscheiden. Bei einer kleinen Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Flüssigkeit bilden sich noch keine Dampfbläschen, durch Temperaturüberhöhung und daraus folgende Dichteänderung der Flüssigkeit kann sich jedoch eine Konvektionsströmung einstellen.

Dieser Bereich der Konvektionskühlung reicht bei Helium bis zu einer Temperaturdifferenz von etwa $0,05 - 0,2 \text{ K}$. Bei Erhöhung des Wärmestroms durch stärkeres Heizen der Oberfläche setzt die Bildung von Dampfbläschen ein (nucleate boiling), die sich von der Oberfläche lösen und die Strömung beschleunigen. In einem vertikalen Kanal kann durch die aufsteigenden Dampfbläschen

eine erhebliche Strömung angefacht werden. Wir beobachteten beim Einsetzen von Bläschenverdampfung einen beachtlichen Rückgang von ΔT , der auf die bessere Wärmeabfuhr beim Entstehen von Dampfbläschen zurückzuführen ist, daher die charakteristische "Nase", im Wärmeübergangsdiagramm.

Bei weiterer Erhöhung des Wärmestroms erfolgt der Übergang zur Filmverdampfung (film-boiling), d.h. der Ausbildung eines geschlossenen Dampffilms auf der Oberfläche, durch dessen isolierende Wirkung ein Temperatursprung auftritt.

Der maximale Wärmestrom im nucleate-boiling-Bereich (im folgenden kurz NBM) ist bei den meisten Kühlproblemen wegen des dabei auftretenden diskontinuierlichen Temperaturverlaufs von großem Interesse.

Beim Zurücknehmen der Heizleistung erfolgt der Übergang zur Bläschenverdampfung bei einem geringeren Wärmestrom als das NBM. Bei weiterer Abnahme des Wärmestroms bleibt Bläschenverdampfung bis zum Abschalten der Heizung erhalten. Eine Temperaturüberhöhung wie beim Hochfahren bleibt aus, zudem ist ΔT bei gleicher Heizleistung durchweg geringer als beim Hochfahren. Dieser Hysteresiseffekt, der oberflächenbedingt ist, läßt sich auf verschieden große Anzahl von Verdampfungscentren bei steigendem und fallendem Wärmestrom zurückführen. Bei steigendem Strom müssen diese Zentren erst gebildet bzw. aktiviert werden, während sie bei fallendem Strom weitgehend erhalten bleiben. Der Bereich zwischen nucleate- und film-boiling ist instabil, weil hier die Wärmeflußkurve eine negative Charakteristik hat (sinkender Wärmefluß bei steigendem ΔT).

Im Allgemeinen wird der Bereich unterhalb des Einsetzens von nucleate-boiling für den Magnetbau eine große Rolle spielen, da bei SL-Magneten in den meisten Fällen mit Kühlleistungen unter 10 mW/cm^2 gearbeitet wird. Auf die in diesem Bereich auftretende Temperaturüberhöhung wird später noch näher eingegangen.

3.1.1 Maximaler Wärmestrom bei Bläschenverdampfung (NBM) an verschiedenen Positionen des Kühlkanals

In einem vertikalen Kanal steigen unten erzeugte Dampfbläschen nach oben, so daß zum oberen Ende hin das Flüssigkeits-Dampf-gemisch zu immer größeren Teilen aus Dampf besteht. Film-boiling setzt daher am oberen Ende ein und pflanzt sich mit wachsendem Wärmestrom nach unten fort. Abb. 3 zeigt Ergebnisse an einem

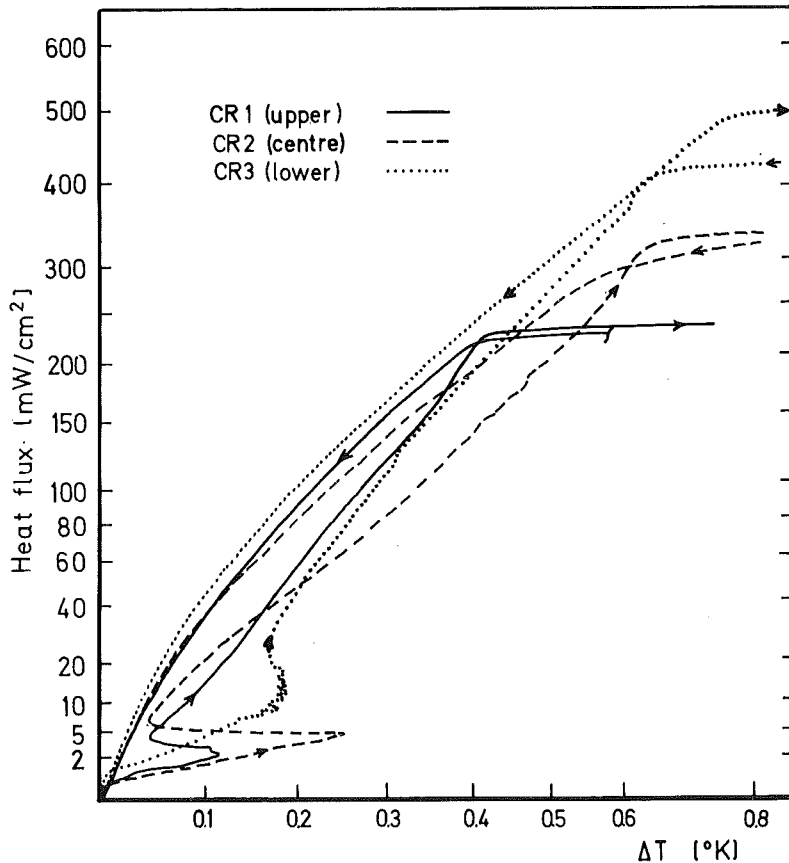


Abb. 3 Wärmeübergangsdiagramm für verschiedene Positionen am Kanal, Kanalquerschnitt 20 x 1 mm², unbearbeitete Oberfläche

Kanal mit 20 x 1 mm² Querschnitt. Es ist die auf dem x-y-Schreiber aufgenommene Originalkurve, Heizstrom über Brückensignal zu sehen, daher die nicht linearen Skalen. Film-boiling

setzt am unteren Kanalende erst bei einer über zweimal größeren Heizleistung als am oberen Ende ein. Auch nucleate-boiling setzt am oberen Kanalende ein und pflanzt sich nach unten fort.

3.1.2 Oberflächeneinfluß

Es wurden Kühlkanäle mit verschieden bearbeiteten Oberflächen getestet:

1. Das die Oberfläche bildende Edelstahlband wurde wie erhalten (ziemlich glatt, jedoch mit vielen Kratzern) verwendet.
2. Das Metallband wurde hochglänzend poliert,
3. es wurde sandgestrahlt.

Den Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit zeigt Abb. 4. Raue Ober-

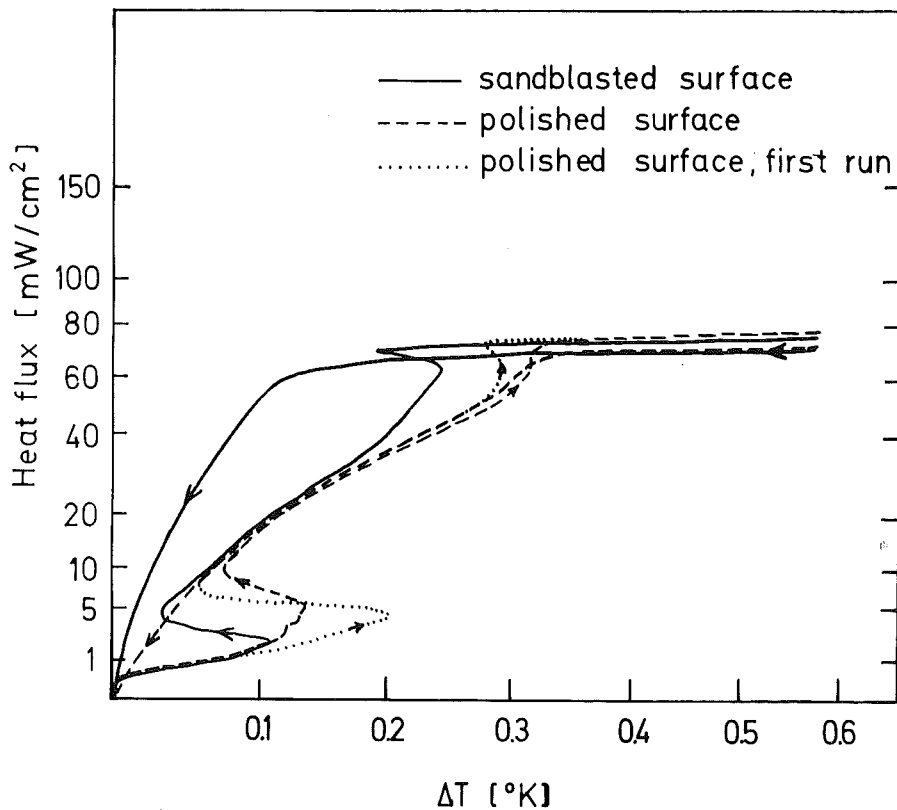


Abb. 4 Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit, Kanalquerschnitt 20 x 0.2 mm², Position CR2 (Kanalmitte)

flächen zeigen eine ausgeprägte Hysterese, während polierte Oberflächen, abgesehen von der Temperaturüberhöhung vor Einsetzen von Bläschenverdampfung, so gut wie keine Hysterese zeigen. Die unbearbeitete Oberfläche zeigte eine geringere Hysterese als die sandgestrahlte, siehe Abb. 3. Der maximale nucleate-boiling-Fluß und der minimale film-boiling-Fluß am oberen Kanalende sind von der Oberflächenrauigkeit unabhängig. Sie waren in allen Fällen sehr exakt reproduzierbar.

Abb. 4 zeigt auch einen Effekt, den wir beim Kanal mit sandgestrahlter Oberfläche in den meisten Fällen für den oberen und mittleren Kohlewiderstand beobachten konnten, eine Temperaturerniedrigung bei wachsendem Wärmefluß kurz vor Einsetzen des film-boiling. Auch bei dem Kanal mit polierter Oberfläche konnten wir diesen Effekt bei einer Kanaldicke von 0.2 mm feststellen, dies weist darauf hin, daß an der "Nahtstelle" zwischen nucleate- und film-boiling eine schmale Zone mit etwas niedrigerer Temperatur und damit erhöhter Kühlleistung vorhanden sein kann.

3.1.3 Epoxydharz beschichtete Oberflächen

Für diese Versuchsreihe wurden die Oberflächen eines Kanals mit einer dünnen Epoxydharzschicht überzogen (Schichtdicke in der Größenordnung 30 μ , nicht sehr gleichmäßig). Eine Wärmeflußcharakteristik zeigt Abb. 5. Die Kurven verlaufen flacher als bei nichtbeschichteten Oberflächen, dabei ist jedoch zu berücksichtigen, daß die Temperatur am Metall gemessen wird, in ΔT ist also der Temperaturabfall in der Epoxydschicht enthalten. Eine Temperaturüberhöhung vor Einsetzen des nucleate-boiling wurde nur in sehr geringem Umfang beobachtet. Daraus schließen wir, daß an Epoxydharzoberflächen Verdampfungszentren leicht aktiviert werden. Den Vergleich mit einer Metalloberfläche zeigt Abb. 6.

Das NBM ist bei beschichteter und unbeschichteter Oberfläche gleich. In Tab. I sind alle Werte für das NBM und den minimalen Wärmestrom im Filmverdampfungsbereich (FBM) zusammengestellt.

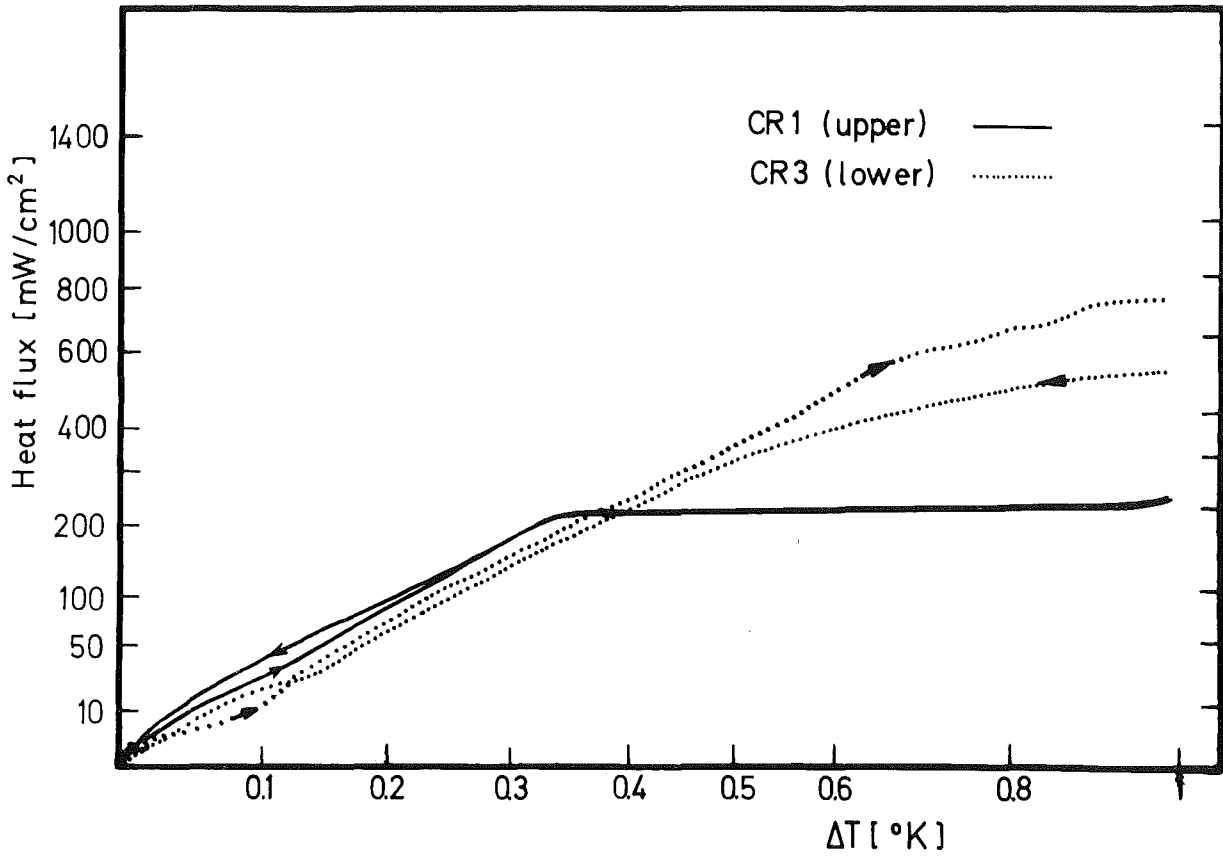


Abb. 5 Epoxydharzbeschichtete Oberfläche, Kanalquerschnitt $20 \times 1 \text{ mm}^2$, 2 verschiedene Meßpositionen

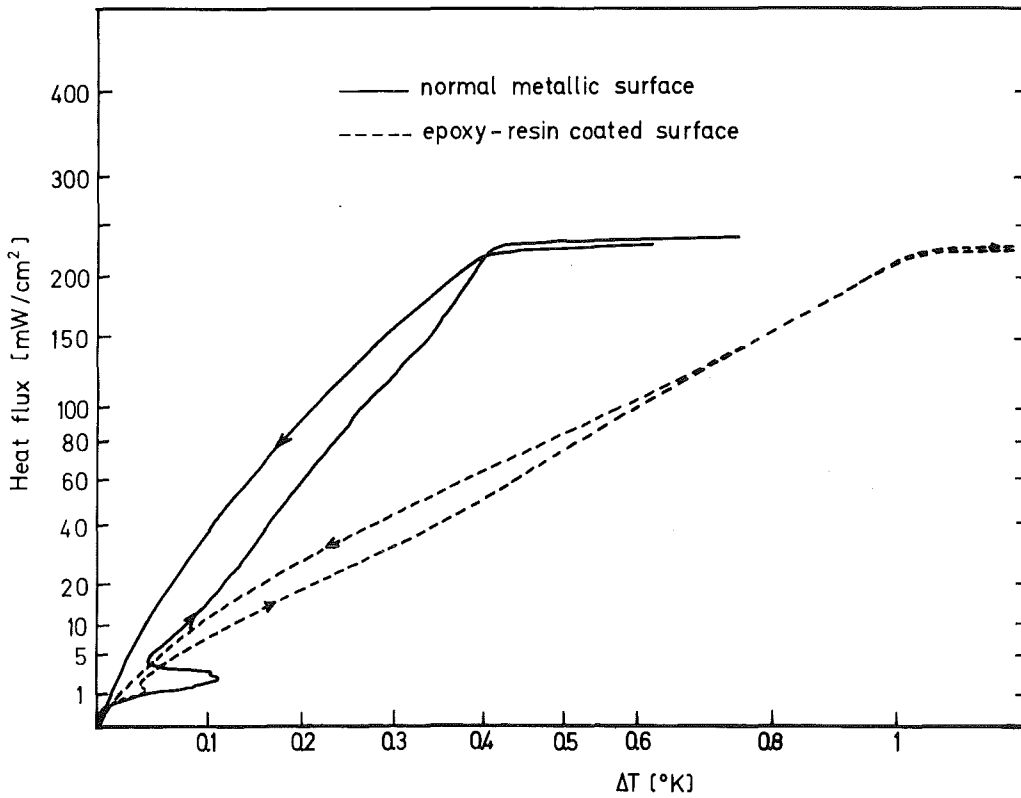


Abb. 6 Vergleich zwischen Metalloberfläche (unbearbeitet) und epoxydharzbeschichteter Oberfläche, $20 \times 1 \text{ mm}^2$, Position CR 1

Ober- flächen- güte	Meß- stelle	Kanalquerschnitt				
		0.2	0.5	1.0	1.5	3 x 20mm ²
poliert	CR1	45 (39)	117 (109)	221 (215)	280 (264)	325 (312)
	CR2	72 (66)	145 (134)		389 (374)	
	CR3	166	258 (229)	577 (415)	545 (390)	470 (378)
unbe- arbeitet	CR1			230 (220)	290 (255)	333 (303)
	CR2		145 (139)	337 (293)	406 (387)	430 (387)
	CR3		277 (260)	498 (416)	512 (430)	450 (391)
sand- gestrahlt	CR1	44 (39)	110 (96)	216 (208)	273 (267)	327 (310)
	CR2	70 (66)	132 (128)	300 (295)	377 (366)	412 (377)
	CR3	202 (154)		602 (458)	630 (502)	607 (460)
epoxyd- harzbe- schichtet	CR1			231 (222)		
	CR2			320 (310)		
	CR3			792 (≈540)		

Tabelle 1 Nucleate-boiling-Maximum und film-boiling-Minimum
(jeweils in Klammern) für einen vertikalen 10 cm
Kühlkanal mit verschiedenen Oberflächengüten
für 3 Meßstellen:

CR1 oberes Kanalende
CR2 Mitte
CR3 unteres Kanalende

Alle Werte in mW/cm²

3.1.4 Temperaturüberhöhung vor Einsetzen des nucleate-boiling

Die Temperaturüberhöhung vor Einsetzen der Bläschenverdampfung wurde von uns in allen Fällen beobachtet, ihre Größe (die Länge der "Nase" war jedoch i.a. nicht gut reproduzierbar, in den meisten Fällen war jedoch beim ersten Hochfahren die Temperaturüberhöhung größer als bei den folgenden Versuchen (siehe Abb. 4). Eine mögliche Erklärung ist, daß die beim erstmal gebildeten Verdampfungszentren bei weiteren Versuchen noch teilweise vorhanden sind oder leichter aktiviert werden.

Die beobachteten Temperaturüberhöhungen lagen zwischen 0,05 und 0,2 K, sie waren am unteren Kanalende weniger ausgeprägt (Abb. 4). In allen Fällen war die Temperaturüberhöhung bei der polierten Oberfläche größer als bei der rauhen (bei gleichen sonstigen Bedingungen) und Bläschenverdampfung setzte bei der polierten Oberfläche erst bei größerem Wärmestrom ein, d.h. rauhe Oberflächen begünstigen die Bläschenbildung.

Da uns zum Zeitpunkt unserer Messung außer einer kurzen Erwähnung in einer Arbeit von Efferson¹⁾ keine Berichte über eine derartige Temperaturüberhöhung in der Literatur bekannt waren, untersuchten wir, ob es sich nur um einen dynamischen Effekt handelt oder ob die Temperaturüberhöhung stationär bleibt, wenn man die Heizleistung bis zu einem bestimmten Punkt auf der "Nase" ansteigen läßt und dann konstant hält. Dazu wurde der Heizstrom langsam bis zum gewünschten Punkt hochgefahren und bei konstanter Heizleistung ΔT über einige Minuten auf einem y-t-Schreiber verfolgt. Abb. 7 zeigt das Ergebnis.

Bis zu einem bestimmten Punkt auf der "Nase" bleibt die Temperaturüberhöhung stabil. Für etwas höhere Wärmeströme geht die Temperatur sehr langsam zurück, für noch weiter zur "Nasenspitze" zu gelegene Punkte geht ΔT immer schneller zurück.

Daraus kann man schließen: Bis zu einem bestimmten Wärmefluß (hier etwa 0.9 mW/cm^2) ist die Aktivierung von Verdampfungs-

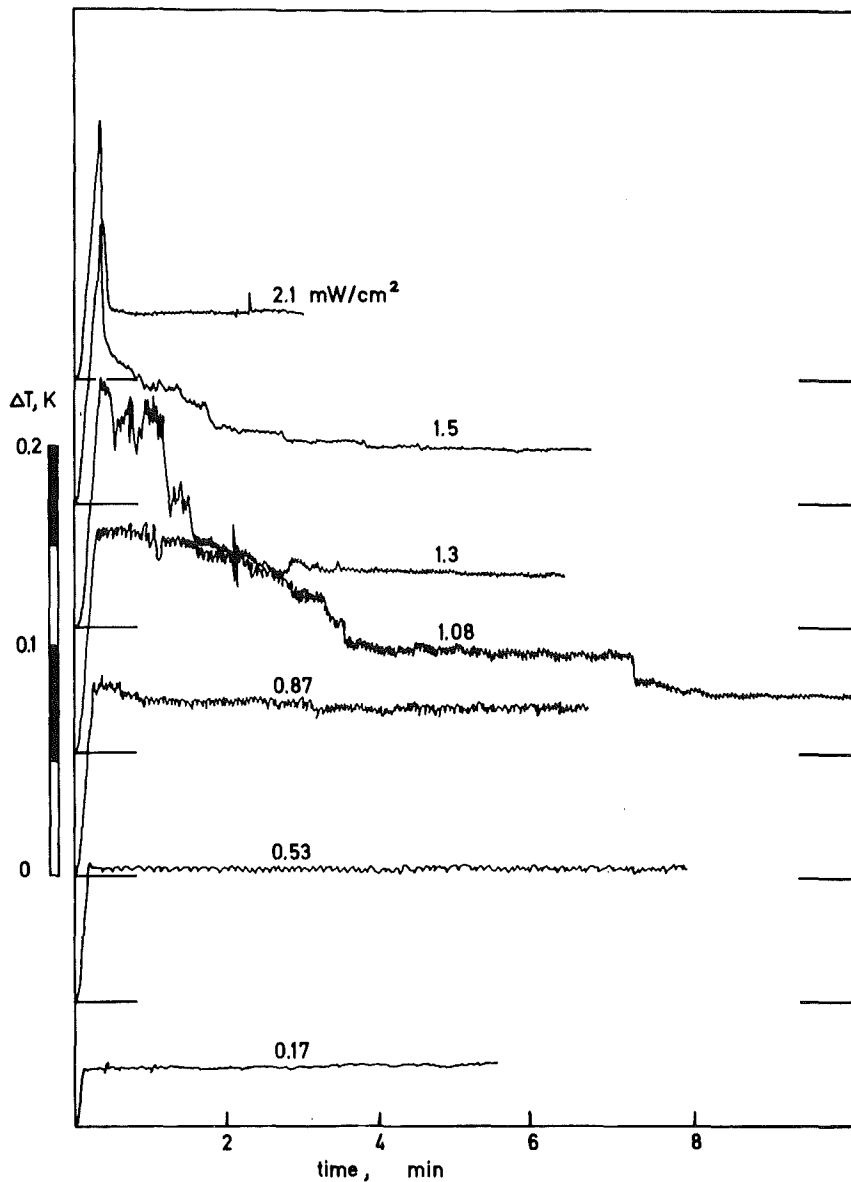


Abb. 7 Untersuchung der zeitlichen Stabilität der Temperaturüberhöhung vor Einsetzen von Bläschenverdampfung, Kanalquerschnitt $20 \times 0.5 \text{ mm}^2$, unbearbeitete Oberfläche, Position CR1

zentren nicht möglich, ΔT bleibt also konstant, bei Überschreiten dieses Wertes werden zunächst sehr langsam, dann immer schneller solche Zentren, an denen sich Bläschen bilden können, aktiviert, so daß die Wärmeabfuhr erheblich verbessert wird und ΔT mit der Zeit sinkt.

Festzuhalten bleibt, daß bei bestimmten Heizleistungen die Einstellzeit viele Minuten betragen kann. Daraus folgt jedoch auch, daß in gewissem Maße die Größe der "Nase" auch von der Änderungsgeschwindigkeit der Heizleistung abhängt. Bei den in Abb.

2 - 6 gezeigten Wärmeübergangscharakteristiken stieg die Heizleistung quadratisch mit der Zeit an (weil der Heizstrom linear anstieg), nach 1 min wurden 100 mW/cm^2 erreicht, bei einer Verlangsamung des Anstiegs (10 mW/cm^2 nach 1 min) zeigt sich jedoch nur eine geringfügige Verringerung der Temperaturüberhöhung.

3.1.5 Einfluß des Kanalquerschnitts auf das NBM

Zur Untersuchung der Abhängigkeit des NBM von der Kanaldicke wurde diese von 0.2 - 3 mm variiert. Ergebnisse zeigt Abb. 8.

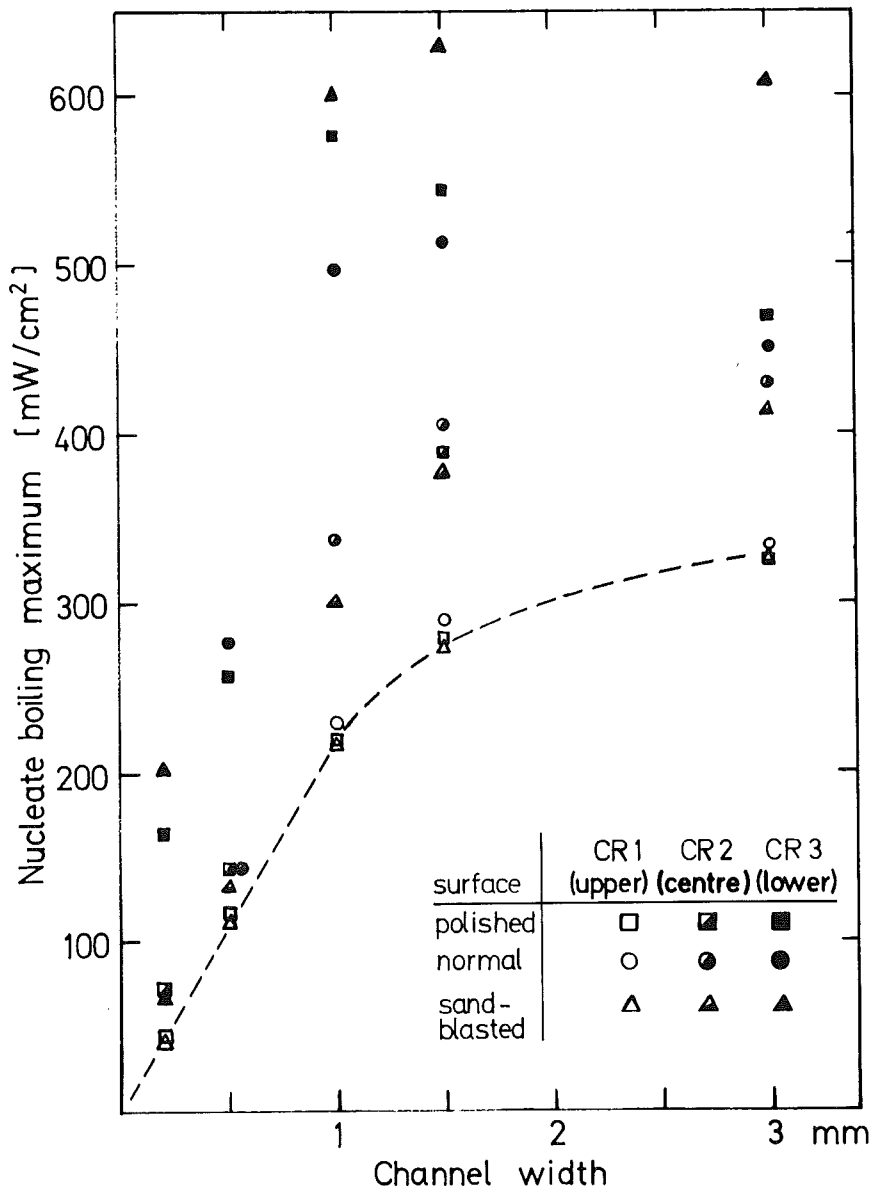


Abb. 8 Maximaler Wärmestrom bei Bläschenverdampfung (NBM) in Abhängigkeit von der Kanaldicke für verschiedene Positionen und unterschiedliche Oberflächengüten. Die gestrichelte Linie verbindet die Werte für CR 1.

Es interessieren im wesentlichen nur die Werte von CR 1, denn in der Praxis darf kein Teil eines Kühlkanals den nucleate-boiling-Bereich verlassen. Die Werte von CR 2 und CR 3 (Kanalmitte und unten) streuen überdies ziemlich stark. Das NBM ist proportional zur Kanaldicke bis zu einer Dicke von etwa 1 mm, darüber hinaus geht das NBM in eine Sättigung über (gestrichelte Kurve), die die Werte einer freien senkrechten beheizbaren Platte darstellen. Die Werte für CR 2 und CR 3 liegen auch für 3 mm Kanaldicke noch wesentlich über denen für CR 1, das entspricht der Tatsache, daß auch für eine freie vertikale Platte das NBM von der Plattenhöhe und dem Ort abhängig ist²⁾. Der Vergleich mit Werten anderer Autoren zeigt befriedigende Übereinstimmung:

Von Wilson³⁾ liegen Werte des NBM von Helium für Kanäle von 2.5 - 20 cm Länge vor, allerdings ist nicht angegeben, an welcher Stelle des Kanals die Messung vorgenommen wurde. Unsere Werte für CR 1 (oberes Kanalende) stimmen mit den Ergebnissen von Wilson für einen 10.16 cm Kanal bis zu Kanaldicken von 1 mm gut überein, bei größeren Kanaldicken liegen Wilsons Werte höher. Ein Grund für die Abweichung könnte eine unterschiedliche Meßposition am Kanal sein.

Werte von Lehongre⁴⁾ und Bailey⁵⁾ liegen etwas unter unseren Ergebnissen. In der Arbeit von Bailey findet man eine ausführliche Literaturzusammenstellung zu Fragen des Wärmeübergangs zu Helium sowie auch einen Vergleich der verschiedenen Ergebnisse und der verwendeten Korrelationsformeln.

3.2. Nicht-stationäre Heizung:

Für diese Messungen wurde das an der Widerstandsbrücke auftretende, die Temperaturdifferenz der Kanalwand zu 4.2 K anzeigende Signal auf einem Oszillographen registriert. Die Einstellzeit der Kohlewiderstände war geringer als 0.05 sec.

Alle Messungen wurden an einem Kühlkanal von 10 cm Länge und einem Querschnitt von 20 x 1 mm² mit unbearbeiteter Metalloberfläche durchgeführt, auch hier wurden beide Kanalwände beheizt. Meßstelle jeweils am oberen Kanalende (CR 1).

3.2.1 Temperaturverhalten beim Ein- und Ausschalten

Die erste Untersuchung galt der Einstellzeit bei Ein- und Ausschalten eines konstanten Heizstroms.

Abb. 9 zeigt einige Ergebnisse: Die aufsteigende Kurve gibt jeweils den zeitlichen Temperaturverlauf beim Einschalten der angegebenen Heizleistung an, die fallende Kurve beim Ausschalten. Nullpunkt der Zeitskala ist der Einschalt- bzw. Ausschaltzeitpunkt.

Bei kleinen Heizleistungen stellt sich in einigen Sekunden die Temperaturdifferenz bei Konvektionskühlung ein, es findet noch keine Bläschenbildung statt (9 a). Bei Heizleistungen zwischen etwa 8 und 25 mW/cm² stellt sich nach einer anfänglichen Temperaturüberhöhung Bläschenverdampfung ein (9 b). Das entspricht genau der zuvor besprochenen Temperaturüberhöhung (bei Vergl. mit Abb. 7 ist der unterschiedliche Kanalquerschnitt zu beachten).

Beim plötzlichen Einschalten der Heizleistung tritt die Temperaturüberhöhung noch bei weit höheren Wärmeströmen auf als beim langsamen Hochfahren (vgl. Abb. 3), da im zweiten Fall natürlich die Temperaturüberhöhung nur bei Einstellzeiten sichtbar ist, die vergleichbar oder größer sind als die Hochfahrzeit.

Bei Heizleistungen bis etwa 160 mW/cm² stellt sich nach einer Einstellzeit von etwa 0.1 sec Bläschenverdampfung ohne vorherige Temperaturüberhöhung ein (9 c), der Bereich, in dem sich die endgültige Temperaturdifferenz in kürzester Zeit und auf einer glatten Kurve einstellt. Ab 165 mW treten nach dem Einstellen von Bläschenverdampfung wiederum Temperaturüberhöhungen auf, die auf kurzzeitiges Auftreten von film-boiling hinweisen (9 d), bei noch etwas höherer Heizleistung kommt es zu Oszillationen, die einige Sekunden andauern können, bis sich ΔT auf dem nucleate-boiling-Wert einpendelt (9 e). Dieses Temperaturverhalten war gut reproduzierbar.

Wir schlagen als Erklärung für diese Ausfälle in den film-boiling-Bereich folgenden Mechanismus vor:

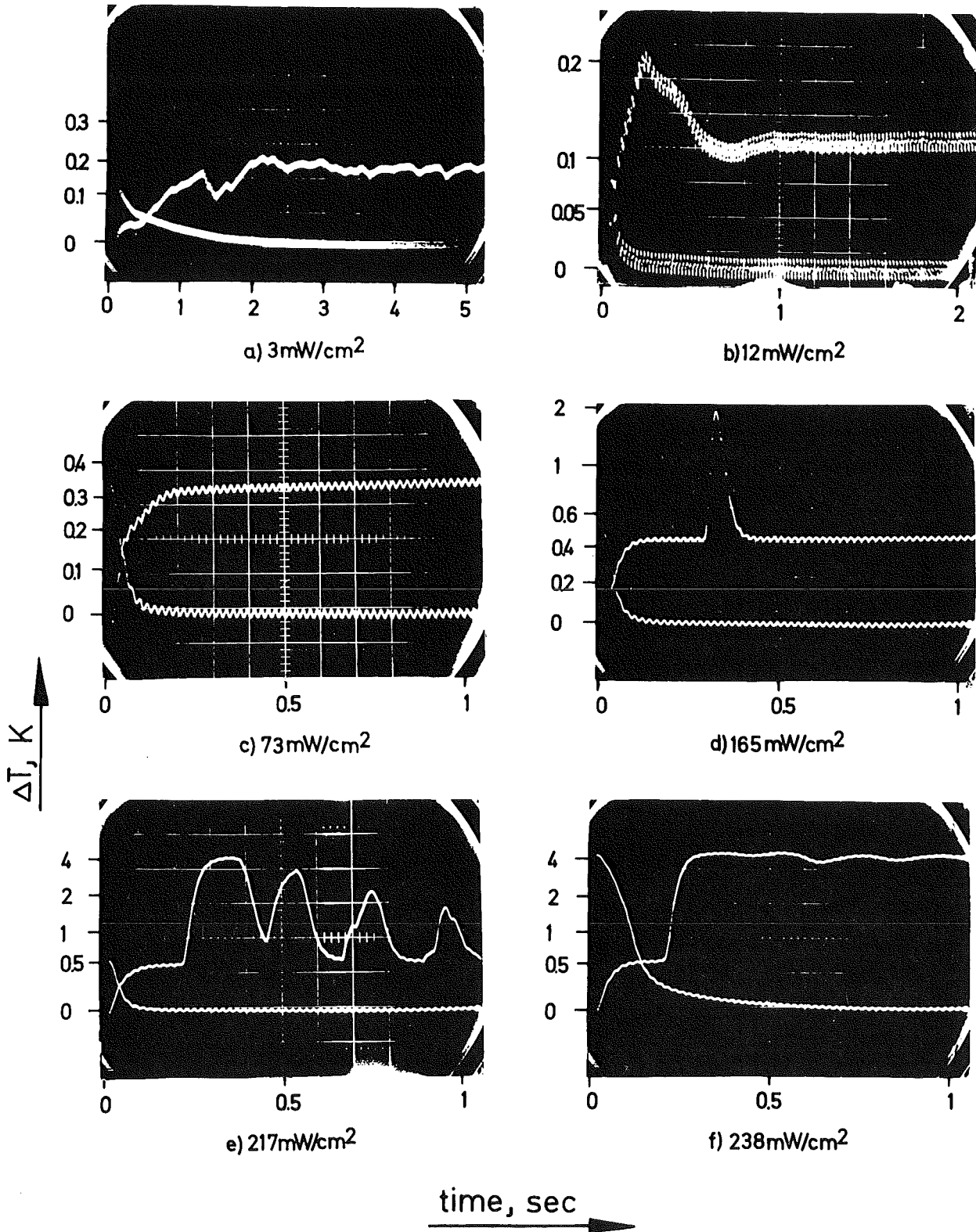


Abb. 9 Temperaturverhalten der Kühlkanalwand beim Einschalten (obere Kurve) und beim Ausschalten der angegebenen Heizleistung, Kanalquerschnitt $20 \times 1 \text{ mm}^2$, Position CR 1.

Im Einschaltzeitpunkt des Wärmestroms ist im Kanal noch keine Strömung vorhanden. Die Kanalwand geht sehr schnell in den nucleate-boiling-Bereich. Bevor die einsetzende Strömung groß genug ist, um die anfallenden Dampfbläschen in ausreichendem Maße abzutransportieren, setzt am oberen Kanalende film-boiling ein. Durch Verringerung des Reibungskoeffizienten zwischen Kanalwand und Helium wird die Strömung beschleunigt und der ganze Kanal wieder in den nucleate-boiling-Zustand überführt. Auf die Möglichkeit einer derartigen Temperaturüberhöhung wurde auch in einer theoretischen Arbeit von Colyer⁶⁾ hingewiesen.

Bei 220 mW/cm^2 pendeln sich die Temperatur-Oszillationen auf dem film-boiling-Wert ein, und bei höheren Heizleistungen setzt nach einem kurzen Zwischenstadium der Bläschenverdampfung film-boiling ohne Oszillationen ein (9 f).

Beim Abschalten ist die Einstellzeit wesentlich kürzer, wie auch von Bailey beobachtet, nach ca. 0.1 - 0.2 sec stellt sich die Badtemperatur ein.

3.2.2 Pulsförmige Heizung

Bei diesen Experimenten wurden die Kanalwände durch einen gepulsten Strom in "Dreieckform" (linearer Anstieg, linearer Abfall des Stromes) beheizt. Zu beachten ist, daß die Spitzen der Dreiecke abgerundet sind, d.h. der Strom geht auch im Minimum nicht ganz auf Null zurück. Die Frequenz beträgt 0.8 Hz. Ergebnisse sind in Abb. 10 zu sehen. Die obere Kurve gibt jeweils den Verlauf des Heizstroms, die untere den Temperaturverlauf über der Zeit wieder. Für den Heizstrom ist keine Skala eingezeichnet, jedoch ist die Heizleistung im Maximum des Stroms angegeben, die mittlere Heizleistung beträgt ein Drittel davon.

Das Temperaturverhalten der Kühlkanalwand läßt sich nach dem bisher Gesagten folgendermaßen erklären:

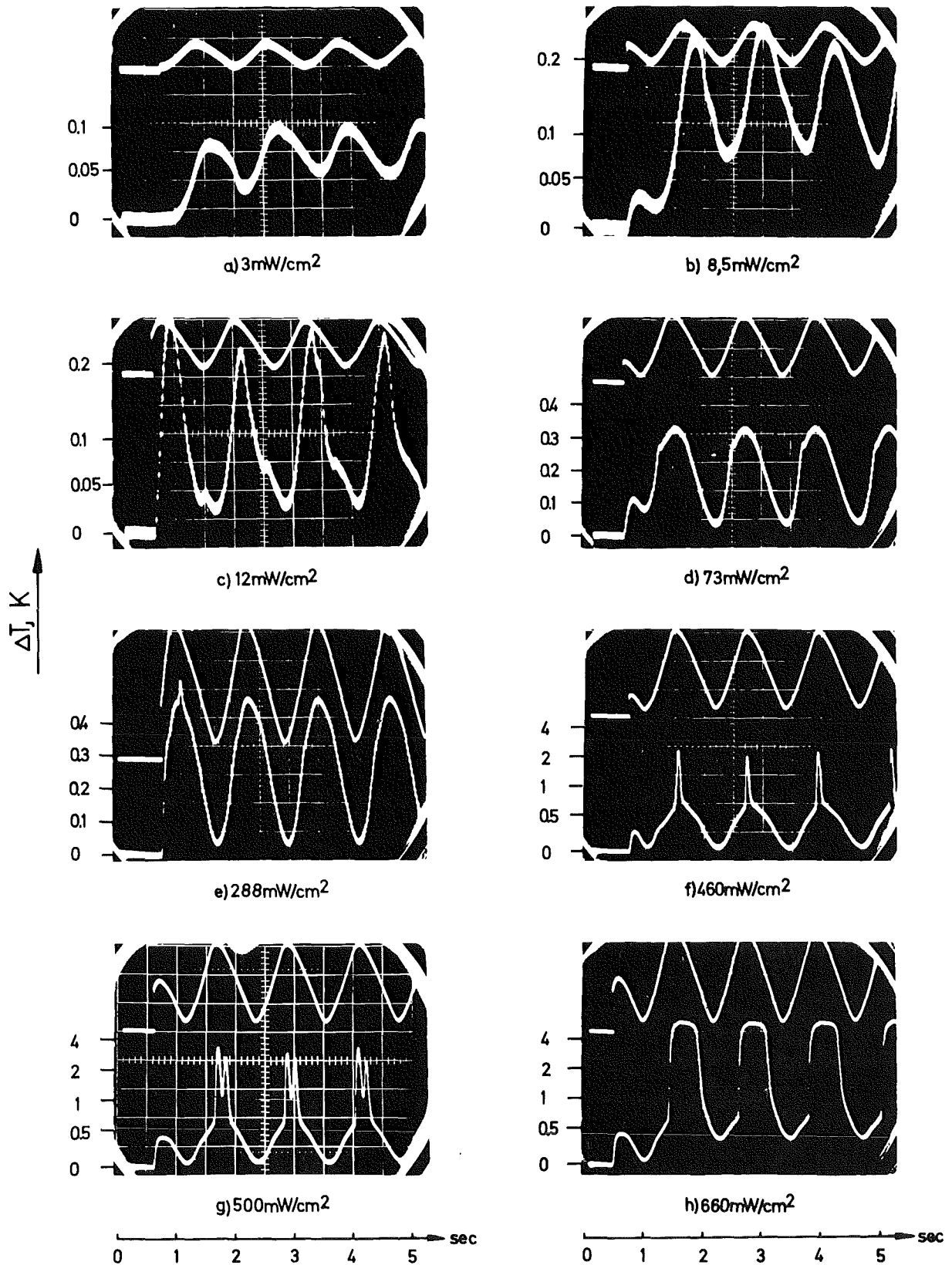


Abb. 10 Temperaturverhalten der Kanalwand bei puls förmigem Wärmestrom. Obere Kurve Heizstrom (ohne Skala), untere Kurve ΔT . Die angegebenen Heizleistungen beziehen sich auf das Strommaximum.

Bei kleinen Heizleistungen bis etwa 9 mW/cm^2 hat man Konvektionskühlung ohne Bläschenbildung (10 a und b), daran erkennbar, daß auch im Minimum des Stroms ΔT noch relativ hoch ist, vergl. die ziemlich lange Einstellzeit in Abb. 9 a. Bei etwas höheren Wärmeströmen setzt Bläschenverdampfung ein, ΔT geht im Minimum annähernd auf Null zurück (10 c). Auch hier tritt eine Temperaturüberhöhung ein, das erste Maximum ist dabei immer besonders hoch. Daß es sich auch hier um die zuvor besprochene Temperaturüberhöhung handelt, läßt sich aus der relativ hohen maximalen Temperaturdifferenz (0.2 K) bei kleinem Wärmestrom (12 mW/cm^2) erkennen, bei doppelt so hohem Wärmestrom trat nur eine gleich hohe Temperaturdifferenz auf.

Bei höheren Heizleistungen tritt Bläschenverdampfung ohne Verzögerung ein (10 d), daher relativ kleines ΔT . In 10 e erkennt man das Auftreten einer kleinen Spitze auf dem ersten Maximum. Das entspricht dem kurzzeitigen Auftreten von film-boiling in Abb. 9 d vor dem Ausbilden einer stationären Strömung. Daraus folgt aber, daß im Pulsbetrieb auch im Stromminimum die Strömung im Kanal nicht völlig zum Stillstand kommt.

Film-boiling tritt im Pulsbetrieb erst bei 460 mW/cm^2 auf, also erst bei einem doppelt so hohen Wert wie im stationären Betrieb (10 f). Das läßt sich leicht verstehen, wenn wir bedenken, daß auch bei hohen Heizleistungen film-boiling immer erst nach einer kurzen Verzögerung einsetzt (vergl. Abb. 9 f). Bei einer Pulsdauer von 1.2 sec reicht die Zeit erst bei hohen Wärmeströmen aus, um film-boiling einsetzen zu lassen. Wir müssen jedoch erwarten, daß bei Pulsen kleiner Frequenz der Durchbruch zum film-boiling schon bei geringeren Heizleistungen erfolgt, im Grenzfall bei demselben Wert wie im stationären Betrieb. Dieses Verhalten wirkt sich für Magnete mit kurzer Pulsdauer vorteilhaft aus.

Abb. 10 g zeigt das Auftreten von Oszillationen auch im Pulsbetrieb, Abb. 10 h den vollen Übergang zum film-boiling, während auch im Minimum des Heizstroms die Temperatur nicht mehr ganz zurückgeht.

Messungen mit pulsförmiger Heizung von Bailey⁵⁾ sind uns erst nach Abschluß unserer Experimente bekannt geworden. In dieser Arbeit werden Kurven der Temperatureinstellzeit beim An- und Abschalten der Heizleistung für einen Kanal von 160 mm Länge und einem Querschnitt von 0.8 x 10 mm gezeigt. Bei 12 mW/cm² beobachtet Bailey keine Temperaturüberhöhung. Zudem sind die Einstellzeiten relativ lang, wir halten es für möglich, daß sich der Kanal noch im Bereich der Konvektionskühlung befand.

Bei Pulsversuchen Baileys mit der gleichen Heizleistung (Rechteckpuls) geht die Temperaturdifferenz auch bei 1 sec Totzeit nur relativ wenig zurück, was ebenfalls auf Konvektionskühlung schließen läßt. Vergl. Abb. 10 a und 10 d: Im nucleate-boiling-Betrieb geht ΔT trotz wesentlich höherer Heizleistung (73 mW/cm²) im Minimum weiter zurück als bei Konvektionskühlung mit nur 3 mW/cm². Bailey beobachtet ein stufenweises Ansteigen der Temperatur beim Einschalten, wenn nicht kurz zuvor geheizt wurde. Dieses Verhalten ist auch bei uns andeutungsweise zu sehen (Abb. 9 a), es deutet darauf hin, daß auch bei Konvektionskühlung eine noch vom letzten Puls herrührende restliche Strömung die Anstiegscharakteristik beeinflussen kann.

4. Diskussion

Die Versuche wurden an Kanälen mit solchen Abmessungen gemacht, wie sie bei Supraleitungs- oder Kryomagneten benutzt werden. Die Ergebnisse haben gezeigt, daß die Temperaturverhältnisse an den Wänden deutlich von der Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst werden. Das Hysteresisverhalten der Wandtemperatur bei steigendem und fallendem Wärmefluß ist eindeutig oberflächenabhängig, was einleuchtend ist, wenn man bedenkt, daß diese Erscheinung im Zusammenhang mit der Anzahl der aktiven Siedezentren steht. Eine raue Oberfläche begünstigt dabei offenbar eine lange Lebensdauer von aktivierten Siedezentren.

Überraschend ist, daß die Temperaturüberhöhung vor Einsetzen der Bläschenverdampfung von ca. 0.05 - 0.2 K bei Wärmestromdichten

von nur 3 mW/cm^2 bei den mit Epoxydharz beschichteten Oberflächen praktisch fehlt, was auf eine Unterdrückung von Siedeverzug an Epoxydharzoberflächen schließen läßt. Denn das flüssige Helium befand sich bei allen Versuchen unter Siedebedingungen. Man kann hier offenbar den Schluß ziehen, daß Epoxydharzoberflächen sehr aktive Siedezentren haben.

Der maximale Wärmestrom bei Bläschenverdampfung (NBM) ist nur eine Funktion der Kanalgeometrie und unabhängig von Oberflächeneffekten. Denn zu diesem maximalen Wärmestrom gehört, ein gewisses Gas-Flüssigkeitgemisch, das wiederum mit bestimmten Antriebskräften gekoppelt ist, so daß nur noch die Geometrie das NBM bestimmt. Bei Kanaldicken über 3 mm nähert man sich dem maximalen Wärmestrom von freien vertikalen Oberflächen. Wie die Messungen gezeigt haben, setzt der Übergang von nucleate- zu film-boiling zunächst am oberen Kanalende ein und dehnt sich nach unten aus.

Messungen des Einstellvorgangs beim Einschalten einer konstanten Heizleistung zeigten, daß außer den Temperaturüberhöhungen bei kleinen Heizleistungen auch bei Heizleistungen in der Nähe des NBM Temperaturüberhöhungen durch kurzzeitigen Übergang in den film-boiling-Bereich auftreten. Andererseits stellt sich bei Heizleistungen oberhalb des NBM film-boiling erst mit kurzer Verzögerung ein.

Diese Verzögerung führt dazu, daß im Pulsbetrieb wesentlich höhere maximale Heizleistungen als im stationären Betrieb im nucleate-boiling-Bereich abgeführt werden können, wenn die Pulszeit kurz genug ist. Die mittlere abführbare Heizleistung ist jedoch geringer als im stationären Fall.

Das Auftreten von regelmäßigen und reproduzierbaren Temperaturoszillationen bei Heizleistungen knapp unter dem NBM (s. Abb. 9 e und 10 g) war bisher noch nicht beobachtet worden. Es zeigt, daß die Temperatur der Kanalwand und damit die Art der Wärmeabfuhr (nucleate- oder film-boiling) eng mit der Strömungsgeschwindigkeit

keit gekoppelt ist. Filmverdampfung beschleunigt offenbar die Strömung wegen der verminderten Reibung zwischen Kanalwand und Flüssigkeit, daher kommt es vor dem Einstellen des Gleichgewichts zu Oszillationen, die einige Sekunden andauern können.

Literatur

1. K.R. Efferson, J.Appl.Phys. 40,5 p. 1995 (1969).
2. C. Johannes, Proc. III. Int.Eng.Conf. Berlin, p. 97 (May 1970).
3. M.N. Wilson, Bulletin de l'Inst.Intern. de froid 46 (1966)
Annexe 5.
4. S. Léhongre et al., Proc. ICEC 2, p. 274 (Brighton 1968).
5. R.L. Bailey, RL-73-089, Rutherford Laboratory (1973).
6. B. Colyer, RHEL/M A 15, Rutherford Laboratory (1971).